

MODELAÇÃO LAGRANGEANA DOS PROCESSOS DE TRANSPORTE NA RIA FORMOSA

RAMIRO J. J. NEVES¹, FLÁVIO A. MARTINS²

RESUMO

Apresenta-se um modelo de advecção-difusão do tipo Lagrangeano para a simulação da dispersão de massas de água provenientes de fontes pontuais e descreve-se o modelo hidrodinâmico usado na simulação do escoamento. Estes modelos são utilizados para a caracterização hidrodinâmica da Ria Formosa do ponto de vista da qualidade da água. Tentam-se encontrar razões para os problemas associados aos viveiros de bivalves, sugerindo-se formas de melhorar a qualidade da água.

PALAVRAS CHAVE: regiões lagunares, modelação numérica, modelo lagrangeano, marés, efluentes

1- INTRODUÇÃO

Os modelos de advecção-difusão são actualmente uma ferramenta fundamental para a compreensão dos sistemas litorais e para a sua gestão. Tradicionalmente estes modelos são do tipo Euleriano, resolvendo a equação de transporte na mesma malha do modelo hidrodinâmico que calcula as velocidades. Nestes modelos a difusão é simulada utilizando coeficientes de difusão turbulenta empíricos [5] ou obtidos a partir de modelos de turbulência. A difusão por efeito de corte nos modelos integrados na profundidade é de difícil simulação, envolvendo derivadas cruzadas [1] e é usualmente desprezada. Estes modelos calculam a concentração em todo o domínio, sendo portanto indicados para simulação de propriedades endógenas ao sistema. A sua precisão depende dos gradientes da propriedade, quando estes são elevados -caso de emissões pontuais- a malha a utilizar deverá ser fina. Além disso o modelo deverá calcular a evolução da propriedade em todo o domínio, incluindo regiões onde ela não é relevante. Nestes casos os custos de computação são elevados e o modelo torna-se pouco interessante.

¹Prof. Associado, I.S.T., Tel. 01-8417397, Fax. 01-8417398, E-Mail. rneves@hidro1.utl.pt

²Prof. Adjunto, Univ. Algarve, Tel. 089-803561, Fax. 089-823539, E-Mail. fmartins@ualg.pt

Nos modelos Lagrangeanos a difusão é simulada considerando uma velocidade aleatória que quantifica o efeito de vórtices de dimensão superior à da partícula e através de um aumento de volume resultante do efeito de vórtices de dimensão inferior à da partícula. Este conceito é antigo e está na base da teoria de Kolmogorov [5], a bibliografia sobre o assunto é no entanto ainda escassa. A simulação do efeito de corte torna-se simples nestes modelos bastando considerar partículas a várias profundidades e impondo um perfil de velocidades no caso do modelo hidrodinâmico ser integrado na profundidade. Outra vantagem deste tipo de modelo é permitir identificar trajetórias e deste modo determinar facilmente quais as zonas de um sistema que influenciam cada região. Neste tipo de modelo a resolução depende exclusivamente da dimensão de cada massa de água considerada. No caso de massas de água muito menores que a dimensão da malha - conveniente para emissões pontuais- é comum designá-las por partículas. Os custos de cálculo variam linearmente com o número de partículas consideradas e portanto são independentes da dimensão do domínio. A principal dificuldade nos modelos Lagrangeanos é o cálculo da difusão, ao contrário dos modelos Eulerianos onde a principal dificuldade -numérica neste caso- está no cálculo da advecção.

Neste artigo é apresentado um modelo para a simulação do transporte de massas de fluido "partículas" emitidas de um ponto. Este modelo apresenta um formalismo completamente lagrangeano, seguindo cada uma destas partículas e calculando as suas propriedades (posição, massa, volume, espessura, etc.) ao longo do tempo. Este modelo é aplicado na caracterização hidrodinâmica da Ria Formosa, determinando-se as taxas de renovação e zonas de influência da água proveniente de vários pontos da ria. Caracteriza-se ainda o padrão e a importância das plumas emitidas pelos principais efluentes domésticos e avançam-se soluções que permitam minorar os efeitos destas emissões melhorando a qualidade da água em certas zonas da Ria Formosa.

2- FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO HIDRODINÂMICO

As equações utilizadas para descrever o escoamento hidrodinâmico são as equações para águas pouco profundas integradas na vertical, que podem ser escritas na sua forma Euleriana como, [8]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad 1$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{H} \frac{\partial(Huu)}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial(Huv)}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{H} \tau_{bx} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad 2$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{H} \frac{\partial(Huv)}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial(Hvv)}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{H} \tau_{by} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad 3$$

Válidas para escoamento incompressível de fluido newtoniano em meio homogêneo e variação da altura da superfície livre suficientemente lenta para que se possa considerar pressão hidrostática.

3- MODELO DE ADVECÇÃO-DIFUSÃO:

A equação de transporte que se pretende resolver é a equação de advecção-difusão [11]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + FP \quad 4$$

Onde c é a concentração da propriedade transportada, D os coeficientes de difusão e FP representa os termos de fonte ou poço dessa propriedade.

Para se descrever este processo num sistema de coordenadas lagrangeano vai-se admitir que o coeficiente de difusão é igual para todas as direcções do espaço, o que equivale a dizer que a turbulência é localmente isotrópica. Esta aproximação é válida quando a dimensão característica da partícula é menor do que a ordem de grandeza da profundidade no local e a partícula não sofre a influência das fronteiras do domínio. Com estes pressupostos a difusão de uma partícula de forma inicial, por exemplo, esférica faz-se com simetria esférica. Por este motivo adopta-se por um sistema de coordenadas lagrangeano do tipo esférico cuja origem coincide com a posição média do centro de massa das partículas emitidas de um certo ponto e se desloca com a mesma velocidade destas. Nesse referencial a equação 4 fica:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial c}{\partial r} \right) + FP \quad 5$$

Do ponto de vista lagrangeano esta equação descreve a variação de c associada a um ponto material que se desloca com o escoamento, desta forma para que o campo de c esteja completamente definido é ainda necessário conhecer-se a posição desse ponto material ao longo do tempo.

A posição das partículas é seguida ao longo do tempo sendo a advecção simulada utilizando, em cada passo de tempo, o campo de velocidades obtido do modelo hidrodinâmico.

A difusão é simulada separando os efeitos das escalas de turbulência de dimensão superior à da mancha das de menor dimensão. As primeiras são responsáveis pelo afastamento das partículas que compõem a mancha e são simuladas por uma velocidade aleatória. As segundas são responsáveis pelo aumento de dimensão de cada partícula e são simuladas por uma taxa de aumento de volume. As coordenadas duma partícula podem assim calcular-se por:

$$\frac{dx}{dt} = u + u' \quad ; \quad \frac{dy}{dt} = v + v' \quad ; \quad \frac{dz}{dt} = w_q + w' \quad 6$$

onde u', v', w' são as componentes aleatórias da velocidade que simulam as grandes escalas de turbulência, w_q é uma velocidade de queda da partícula para o caso de partículas com deposição e u e v são as velocidades do campo hidrodinâmico.

Denominando por R uma medida da dimensão da partícula o coeficiente de difusão para condições de turbulência homogênea e isotrópica pode ser calculado por $D = \alpha R^\beta$ onde α é uma constante que para escoamentos oceânicos toma valores na gama $0.002 - 0.01 \text{ cm}^{2/3}/\text{s}$ e β é um expoente que depende do escoamento e da dimensão da partícula sendo usual utilizar o valor 4/3 (lei dos 4/3 de Kolmogorov). Nestas Condições obtém-se a seguinte solução para a eq. 5 [5]:

$$c(R, t) = \frac{1}{\left(2\pi(\alpha(2-\beta)t)^{\frac{2}{2-\beta}}\right)^{\frac{3}{2}}} \cdot \exp\left(\frac{-R^2}{2(\alpha(2-\beta)t)^{\frac{2}{2-\beta}}}\right)$$

Esta solução tem a forma de uma distribuição normal. O raio que abarca aproximadamente 95% da massa da partícula é $r = 4\sigma = 4\sqrt{(\alpha(2-\beta)t)^{\frac{2}{2-\beta}}}$ com o que se obtém um aumento de volume no tempo da forma $v \propto t^{\frac{3}{2-\beta}}$ ou, em termos de volume $dv/dt = K_{vol} v^{\frac{1+\beta}{3}}$. Dada a incerteza do valor de β e por questões de simplicidade optou-se pela lei de variação de volume na forma

$$\frac{dv}{dt} = K_{vol} v \quad 7$$

O termo de fonte e poço contabiliza o decaimento da massa de poluente com o tempo utilizando-se a usual lei de decaimento do tipo exponencial:

$$\frac{dm}{dt} = K_{mass} m \quad 8$$

4- APLICAÇÃO DOS MODELOS, CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA

A Ria Formosa é um sistema lagunar com uma área de aproximadamente 18400 ha. É caracterizada por uma vasta região de sapal, atravessada por inúmeros canais e protegida do mar aberto por um cordão de ilhas de constituição arenosa. A aquacultura é, a seguir ao turismo, uma das actividades económicas de maior importância para a região, destacando-se de entre os vários ramos a cultura de moluscos bivalves com um mercado anual de mais de 3 milhões de contos [3].

A cultura de bivalves é uma das actividades mais sensíveis à qualidade das águas da ria, tendo-se nos últimos anos assistido a vários períodos de elevada mortalidade atribuída a problemas de poluição orgânica da qual resultam valores baixos de oxigénio dissolvido em situações de temperatura elevada. Outro factor com grande importância para os viveiros é o tempo que estes se encontram a descoberto, esta variável é importante por vários motivos. Os moluscos são animais filtradores que respiram e se alimentam através de sífoes, filtrando os alimentos e o oxigénio da água. Por esse motivo existe um tempo de descobertura óptimo acima do qual os moluscos se ressentem. O tempo de descobertura é também um dos factores que mais condiciona a temperatura dos sedimentos onde se desenvolvem os bivalves sendo possível atingirem-se temperaturas da ordem dos 40 °C em zonas com tempo de descobertura elevado quando o sol incide directamente no viveiro.

Para quantificar tempos de residência nos locais onde estão instalados os principais viveiros foram definidas no modelo caixas de monitorização, como indicado na figura 1a). No interior dessas calcularam-se os valores médios das variáveis caracterizadoras da qualidade da água. A água existente no interior da Ria foi também dividida em zonas, denominadas caixas de emissão, representativas das principais massas de água -fig. 1b)-. A água de cada caixa de emissão é dividida em partículas de massa uma a duas ordens de grandeza inferior à massa de água da caixa respectiva sendo as partículas lançadas simultaneamente e monitorizadas ao longo do tempo.

A figura 2 representa as posições das partículas em situações próximas da baixa-mar (a) e da preia-mar (b) num campo hidrodinâmico forçado apenas por maré. Como parâmetro caracterizador da qualidade da água utilizou-se a fracção de água renovada no interior de cada caixa de monitorização em função do tempo.

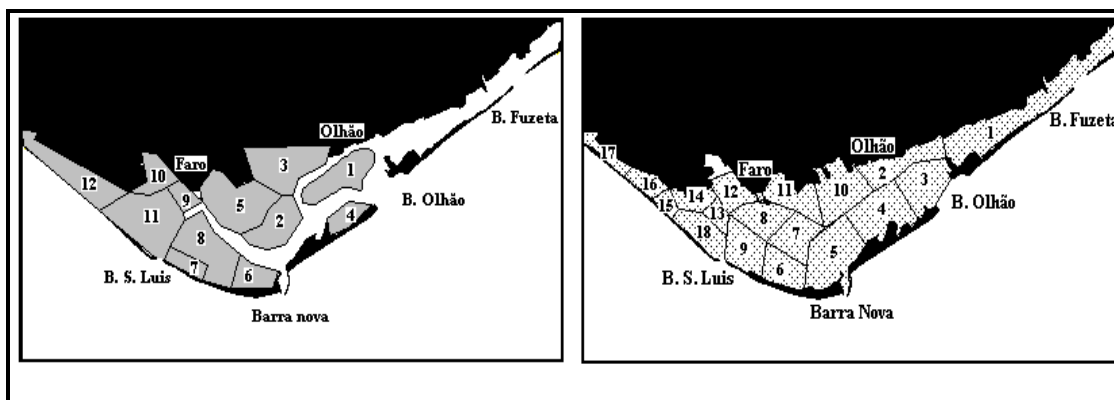


Fig. 1: a) Caixas de monitorização b) Caixas de emissão

Na figura 3a) representa-se para cada caixa de monitorização, o número de horas necessárias para que a renovação seja superior a 80%. Verifica-se, forma geral, uma boa concordância entre os viveiros de melhor produção e as caixas de monitorização com maior taxa de renovação -caixas 4,6,7,8 e 11. A caixa 1 é excepção pelos motivos que se referem mais adiante.

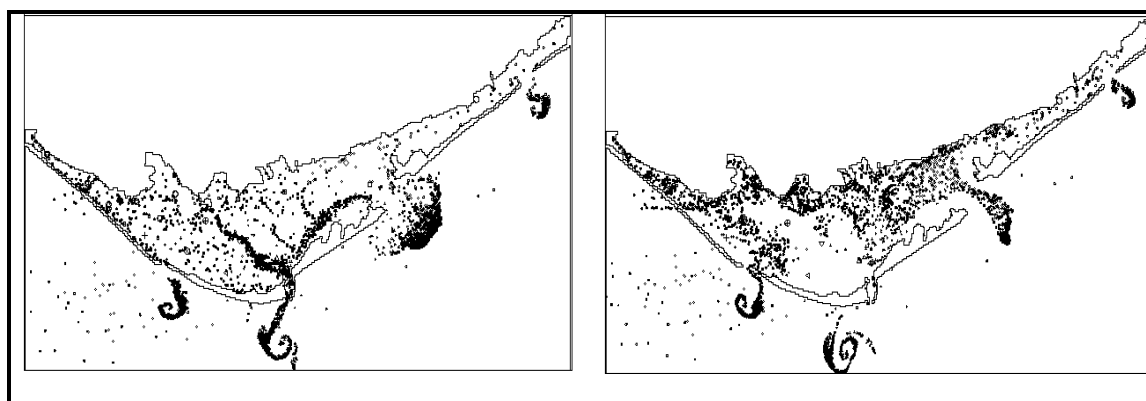


Fig. 2: Posição partículas sem v.deriva a) 6h11m , b) 11h11m após preiamar

A análise da figura 2 permite concluir que nas zonas das barras se verifica um refluxo durante o período de enchente com a consequente reentrada de massas de água que tinham saído durante a vazante. Este facto é principalmente visível nas barras de sotavento e explica a renovação quase nula da água da caixa de monitorização 1 que coincide com uma zona de muito boa produção.

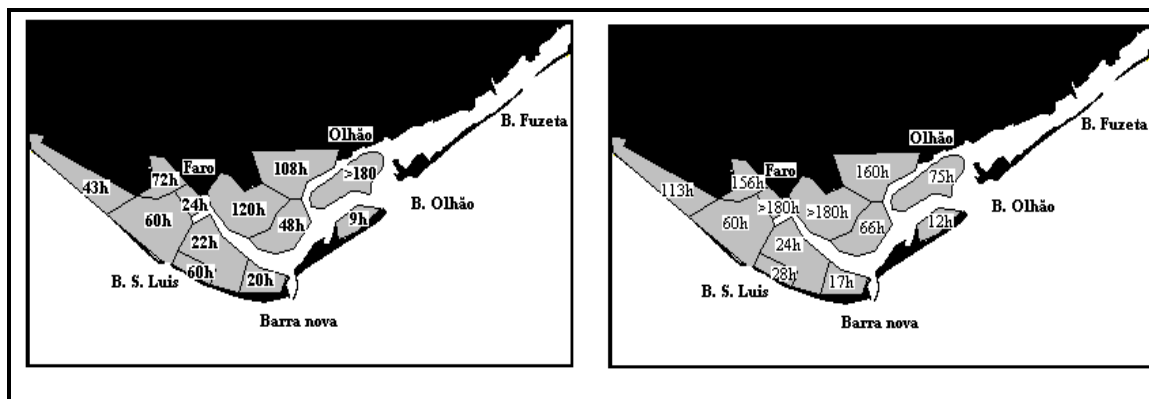


Fig. 3: Horas até 80% de renovação a) Sem v. deriva b) V. Deriva=0.2m/s E

Este mau resultado deve-se à não consideração da corrente de deriva litoral associada ao vento e à circulação oceânica. Quando esta corrente possui alguma intensidade as massas de água afastam-se da zona de influência das barras durante a vazante não reentrando por isso na enchente seguinte. Esta situação de corrente foi simulada adicionando uma velocidade de deriva às partículas no exterior da ria. Considerou-se como primeira aproximação uma velocidade de 0.2 m/s na direcção das correntes dominantes (Oeste-Este) [6]. Na figura 4 representam-se as partículas nos mesmos instantes da figura 2 mas agora com a influência da velocidade de deriva. O afastamento das partículas é clara. A figura 3b) quantifica esta nova situação. Por comparação com a figura 3a) é visível a maior eficiência do processo de renovação da água da ria nas zonas de influência das barras de sotavento como é o caso da caixa de monitorização 1. Os viveiros coincidentes com esta caixa são assim muito influenciados pelas condições de corrente existentes na barra de Olhão. Com esta situação de corrente verifica-se uma menor renovação da metade Oeste da ria. Este facto deve-se possivelmente à reentrada pela barra nova, durante a enchente, de partículas que tinham saído pela barra de S. Luís na vazante anterior.

Identificaram-se também as origens das massas de água não renovadas, o que permitiu tirar algumas conclusões quanto ao padrão de circulação da água não renovada na Ria.

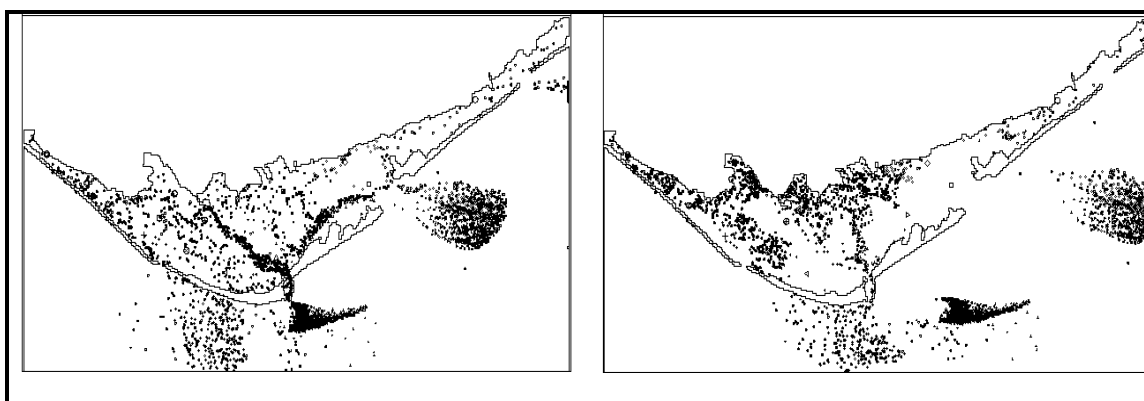


Fig. 4: Posição partículas c/ v.deriv. a) 6h11m , b) 11h11m após preamar

A continuação da simulação mostra que estas massas de água residual são difíceis de renovar por advecção e, por isso o seu tempo de residência está associado aos processos de mistura de pequena escala. Verifica-se também que a qualidade da água de uma determinada região é condicionada directamente pelas emissões provenientes de certas zonas bem definidas, não estando dependente dos acontecimentos da totalidade da ria. Esta matriz de influências é vital para se avaliar o impacte de acções levadas a cabo num determinado local nas restantes zonas da ria.

O modelo hidrodinâmico permitiu ainda o cálculo dos tempos médios de descobertura representados na figura 5. Observa-se que os principais viveiros de bivalves se encontram implantados em zonas onde os tempos médios de descobertura não ultrapassam as 7 a 8 horas em cada ciclo de maré. Existem no entanto excepções, como é o caso dos viveiros coincidentes com as caixas 7, 8 e 11 que são classificados com sendo de boa e muito boa produção embora apresentem tempos médios de descobertura da ordem das 9 a 10 horas. Deve no entanto ter-se em atenção que os viveiros atrás citados se encontram em zonas de muito boa renovação da água. Este resultado sugere no entanto que um novo levantamento topográfico desta área deveria ser feito.

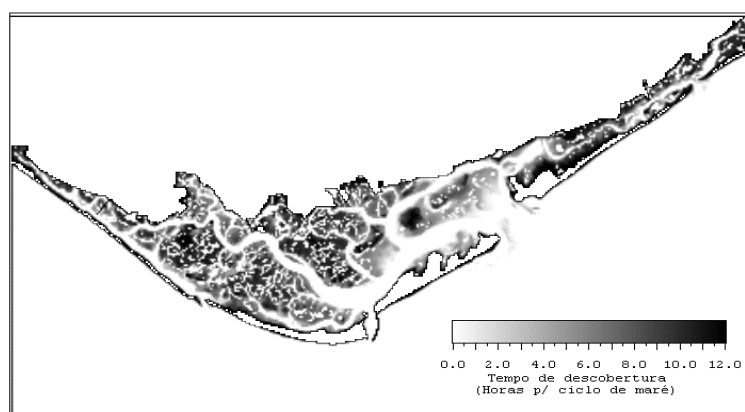


Fig. 5: Número médio de horas de descobertura por ciclo de maré

5- APLICAÇÃO DOS MODELOS, DISPERSÃO DE POLUENTES

Um outro aspecto que mereceu a atenção deste estudo foi a caracterização da qualidade da água da ria do ponto de vista da contaminação bacteriológica. Para isso fez-se um levantamento dos principais efluentes domésticos tendo-se obtido estimativas das localizações e caudais dos principais emissários de águas residuais. Os dados utilizados são os constantes da tabela I correspondendo aos valores de época alta no ano de 1995 [2],[4],[12]:

Emissário	Q(litr./s)	C /100ml	Emissário	Q (litr./s)	C /100ml
M. Galvana	2.89	1.0×10^6	M. Lázaro	81.86	1.0×10^6
Cava	3.10	1.0×10^6	Rib. Lavadeiras	70.03	1.0×10^6
Zona Baixa	74.05	1.0×10^6	ETAR Olhão	86.88	5.0×10^2
Ponte CF	7.78	1.0×10^6	ETAR NW Faro	46.30	1.0×10^4
S. Francisco	21.40	1.0×10^6			

Tabela I: Características dos emissários (época alta 1995)

Estes dados têm alguma incerteza nomeadamente no que se refere aos caudais e eficiência real das ETAR. Apesar destas limitações pensa-se que os resultados obtidos são representativos das condições de qualidade da água no interior da ria.

Na figura 6 são apresentados os valores previstos das concentrações em coliformes fecais numa situação de preia-mar e de baixa-mar com maré viva. Devido a ter-se considerado que a ETAR de Olhão tratava com elevada eficiência todos os efluentes dessa zona as concentrações médias nessa região são várias ordens de grandeza inferiores às verificadas na zona de Faro. Este é um bom exemplo da melhoria da qualidade da água (pelo menos em termos de coliformes fecais) obtida com a instalação de estações de tratamento de águas residuais. Espera-se por esse motivo que as características na zona de Faro mudem substancialmente com a entrada em funcionamento da ETAR nascente de Faro. Quanto aos viveiros de bivalves a simulação aponta para concentrações relativamente baixas na generalidade das caixas de monitorização encontrando-se mais afectadas as caixas 9 e 10 na zona de Faro e a caixa 3 na zona de Olhão.

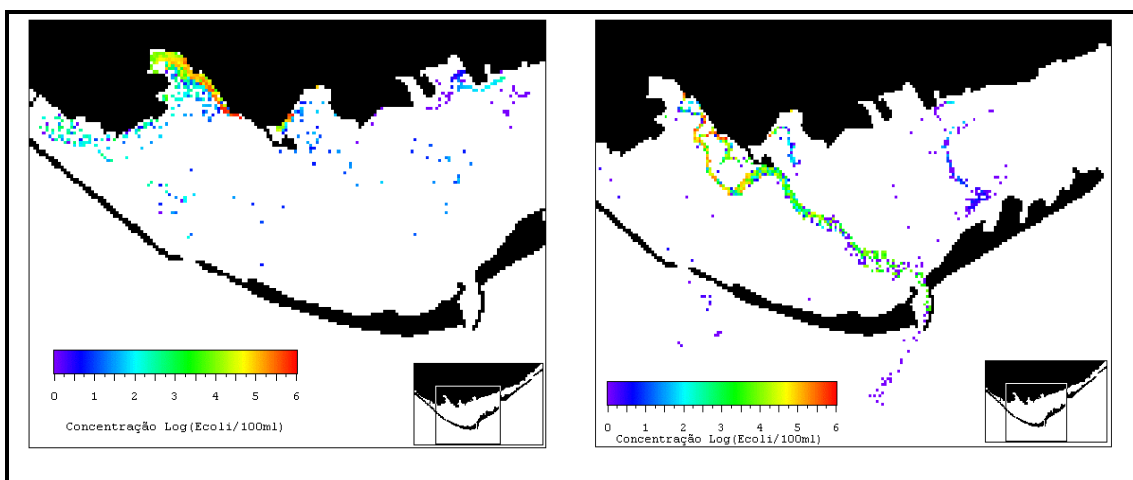


Fig. 6: Concentrações em Ecoli após 7 dias a)Preia-mar b)Baixa-mar

Uma outra variável de interesse é o tempo de excedência de uma determinada concentração. Na figura 7 apresentam-se os tempos médios de excedência por ciclo de maré para uma situação de maré viva. Os valores de concentração escolhidos foram 100 E.coli / 100 ml e 2000 E.coli / 100 ml que são respectivamente os valores guia e imperativo estipulados pelo Ministério da Saúde para a qualidade da água do mar em zona balnear. Pode-se observar que no interior da ria as zonas com maior tempo de excedência são as zonas dos canais concluindo-se que a situação não é muito preocupante nas zonas balneares.

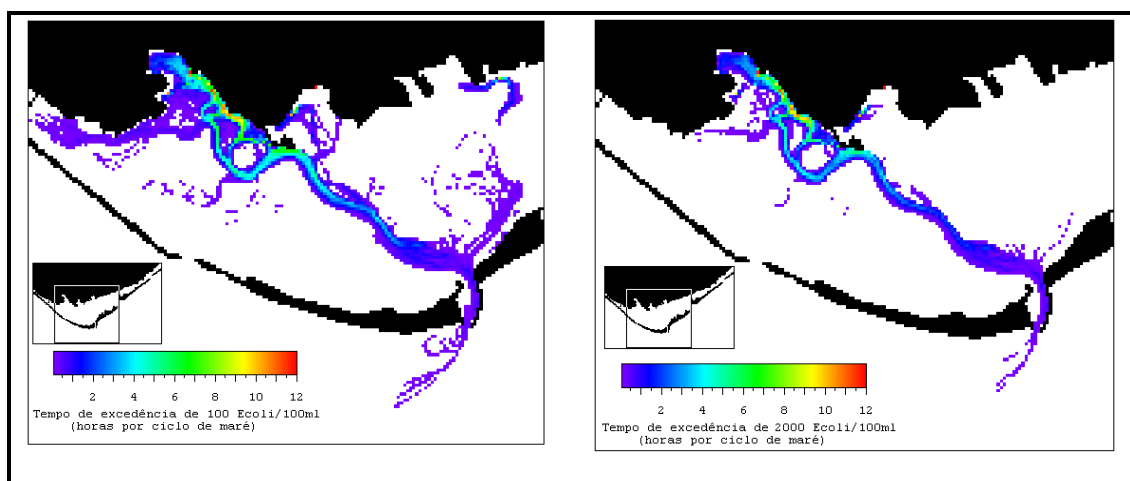


Fig. 7 Horas de excedência p/ ciclo maré a)100Ecoli/100ml b)2000Ecoli/100ml

6- CONCLUSÕES

Neste artigo analisam-se os processos de transporte na Ria Formosa utilizando um modelo Lagrangeano. Com este modelo são determinados os tempos de residência da água em cada região da Ria, as trocas entre regiões e ainda o destino dos coliformes fecais emitidos pelos principais pontos de descarga dos efluentes urbanos de Faro e Olhão. Os resultados mostram que a corrente de deriva litoral condiciona muito os tempos de residência no interior da Ria e que existe uma boa correlação entre as produtividades dos viveiros de bivalves e a renovação da água. O modelo permitiu ainda identificar as fontes de contaminação potencial de cada zona da Ria e os tempos de excedência de cada concentração de coliformes nos diferentes pontos da ria. Os resultados obtidos mostram que um modelo do tipo Lagrangeano é adequado para a gestão da qualidade da água na Ria.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adam, Y. 1975. *Projet Mer, Modèles de Dispersion*. vol. V Ed. J. C. J. Nihoul et Y. Adam.
- [2] Cachola, R. 1995 *Dados não publicados*. IPIMAR
- [3] Convié F. 1994. *Estudo de viabilidade económica e técnica da Ria Formosa*. Tese D.E.A. Univ. Liège.
- [4] Dionísio, L. P. 1995. *Dados não publicados*. Univ. Algarve.
- [5] Fischer, H. B.; List, E. J.; Koh, R. C. Y.; Imberger, J; Brooks, N. H. 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, Inc. California.
- [6] Hellerman, S. e Rosentein, M. 1983 Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. *J. Phys. Oceanogr.* **13**, 1093-1104.
- [7] Leendertse, J. J. 1970. *A water quality simulation model for well mixed estuaries and coastal seas*. Vol. I Rand Corporation, Memorandum RM-6230-RC, Santa Monica
- [8] Neves, R. J. J. 1985. *Étude expérimental et modélisation mathématique des circulations transitoires et résiduelle dans l'estuaire du Sado*. PhD tese, Univ. Liège.
- [9] Nihoul J. C. J. 1980. *Marine turbulence*. Ed. J. C. J. Nihoul, Elsevier Pub. Co. Amsterdam.
- [10] Rodi, W. 1980. *Prediction methods for turbulent flows*. W. Kollman Ed. Hemisphere Publ. Co. Washington. pp 299-349
- [11] Shaw, R. W. e Munn, R. E. 1971. *Introduction to the scientific study of atmospheric pollution*. D. Reidel pub. Dordrecht, Holland. pp 53-96.
- [12] Direcção Geral do Saneamento Básico, 1986. *Sistema interceptor e ETAR nascente da cidade de Faro, Projecto de execução*.